

# *Transport de particules solides par la turbulence de paroi*

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique  
(LMFA) UMR 5509

Université Claude Bernard Lyon 1

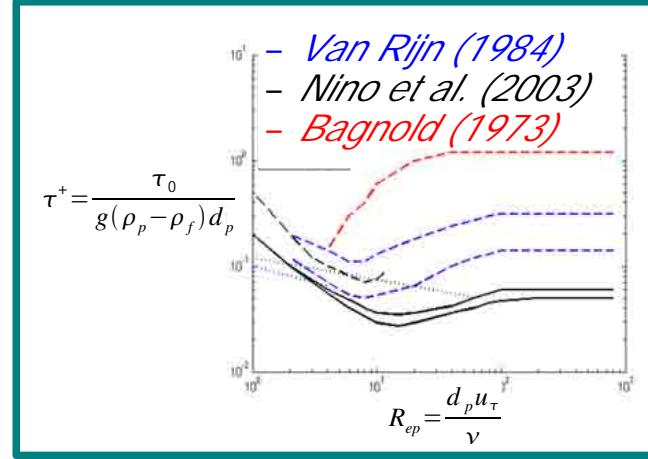
*I. Vinkovic, D. Doppler, M. Prével, M. Buffat*

# Contexte scientifique

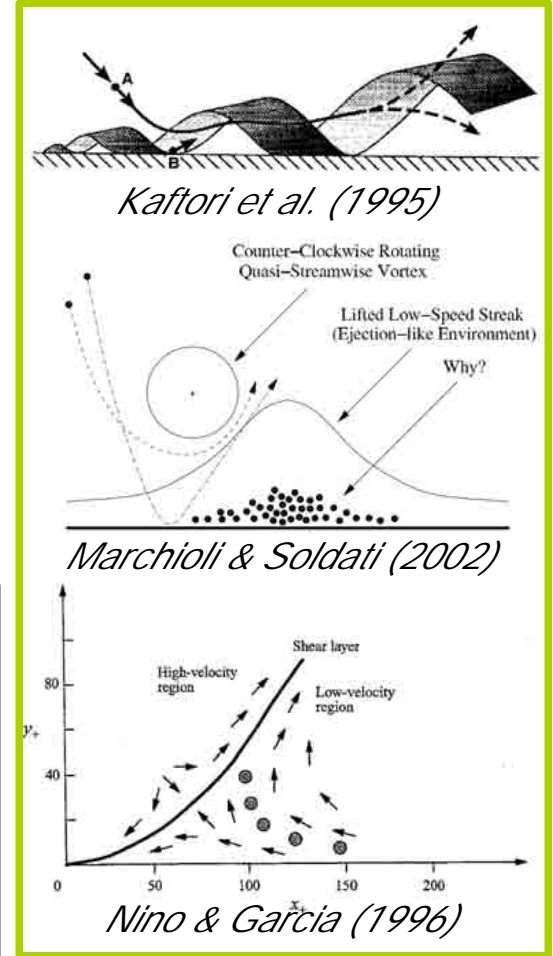
## Applications



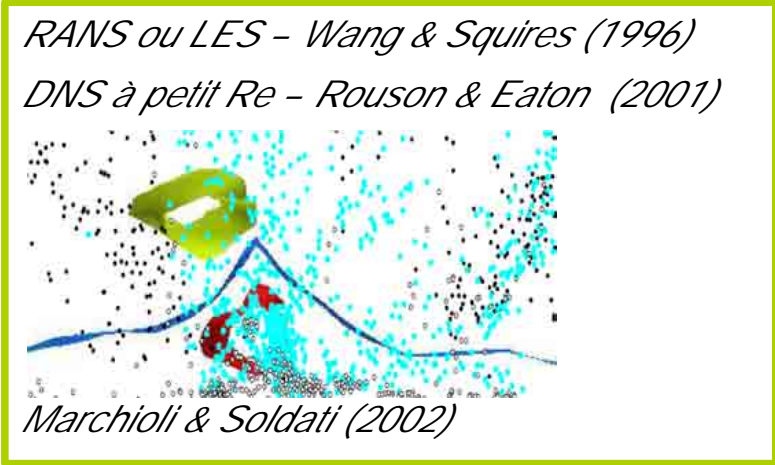
## Seuil de suspension



## Mécanismes de transport



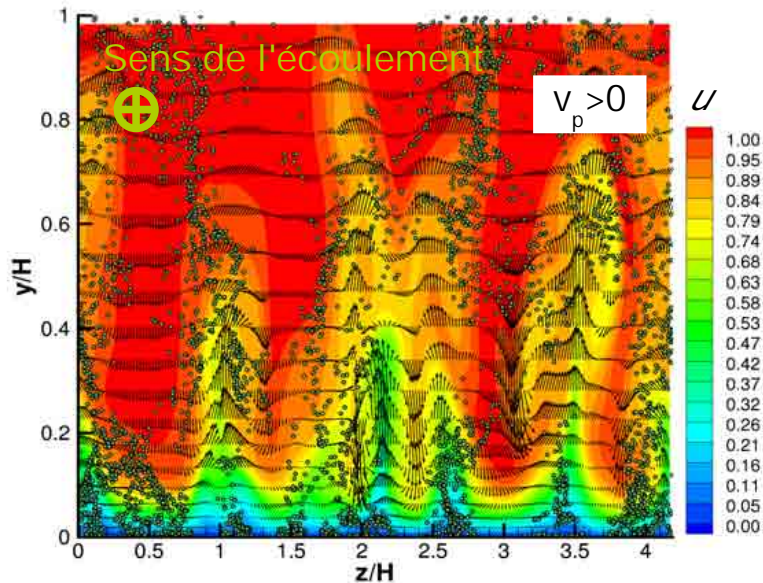
## Simulations numériques



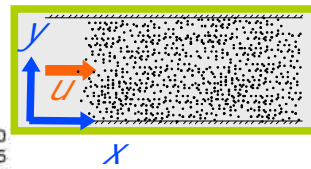
**Objectif :**  
 Identifier les mécanismes en jeu dans le transport de particules

## Contexte scientifique

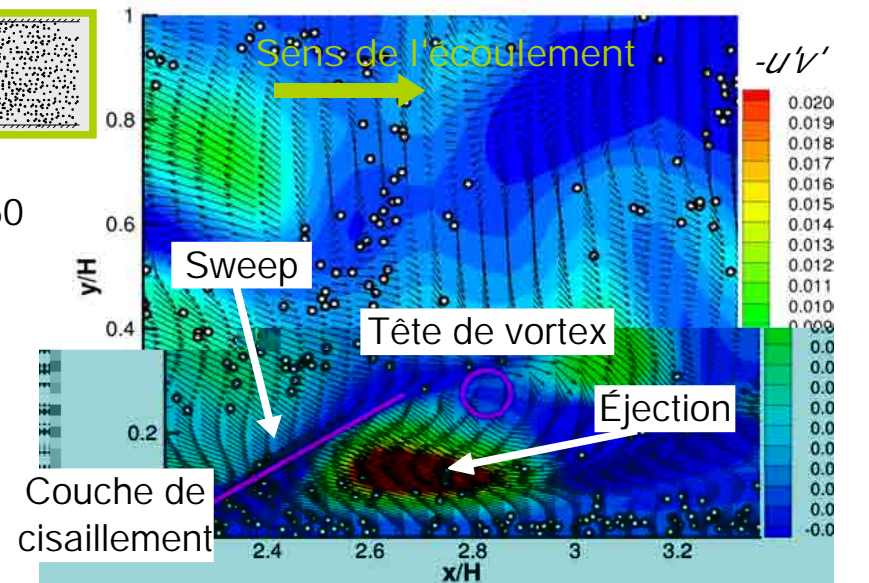
- Concentration des particules dans les régions de faible vitesse longitudinale en proche paroi - *Kaftori et al. (1995), Nino & Garcia (1996)*



Particules montantes et vitesse longitudinale  
 Isocontours de  $u$ , vecteurs vitesse  $v'$ ,  $w'$



$Re=2,660$   
 $St=5$



Signature d'un tourbillon en épingle à cheveux  
 Isocontours de  $-u'v'$ , vecteurs vitesse  $u'$ ,  $v'$

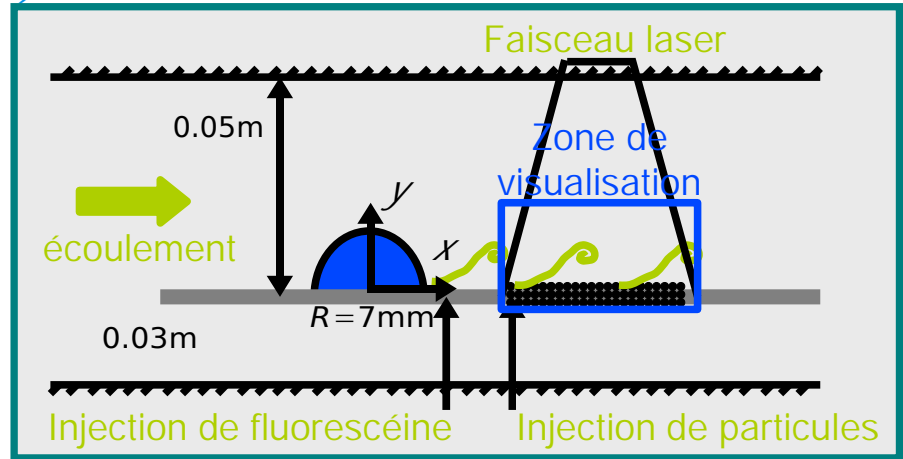
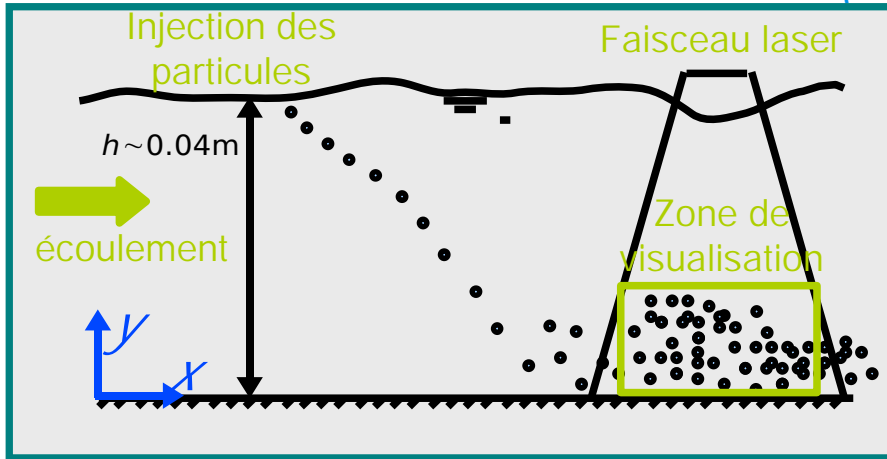
Comment les particules solides interagissent  
 avec les tourbillons en épingle à cheveux ?

## Plan

- Étude expérimentale – thèse de J. Le Louvetel
  - Écoulement en canal turbulent
  - Écoulement derrière un hémisphère
- Étude numérique
  - Écoulement en canal turbulent
  - Écoulement derrière un hémisphère – thèse de M. Prével
- Résultats et analyse
  - Transport de particules montantes par les éjections
  - Seuils de suspension
- Conclusion

# Études expérimentales – thèse de J. Le Louvetel

Le Louvetel et al. (2009) *Water Resour. Res.*



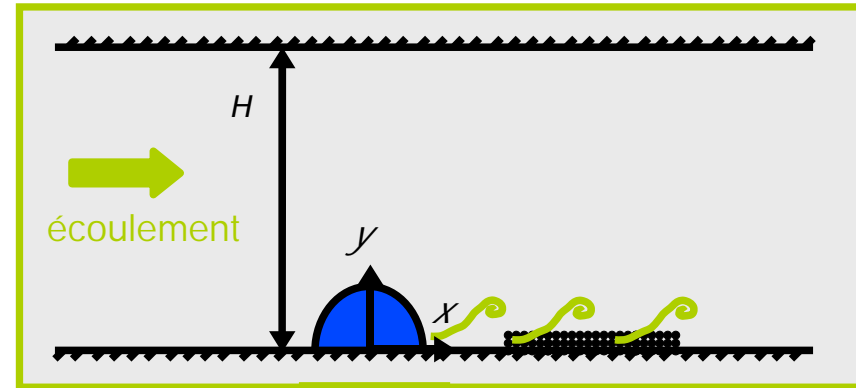
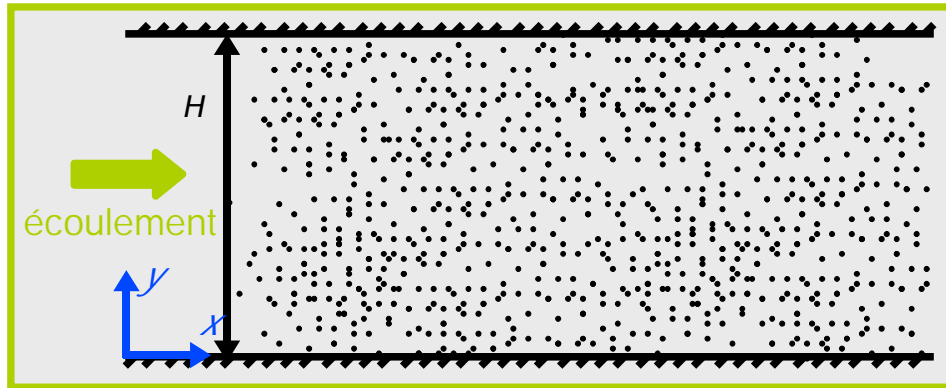
## Mesures simultanées PIV / PTV

Installations expérimentales au LMFA sur le campus de l'INSA Lyon

- $Re = 10,000 - 30,000$
- $St = \tau_p / \tau_f = 2 - 10$
- $u_* / W_{chute} = 0,4 - 1,3$
- $C_{moy} \sim 8 \cdot 10^{-4}$
- $Re = 2,300 - 3,000$
- $St = \tau_p / \tau_f = 1 - 3$
- $u_* / W_{chute} = 1,4 - 4$
- $C_{max} = 2 \cdot 10^{-4}$

*Transport de particules solides par la turbulence de paroi*

## Études numériques



### DNS avec suivi Lagrangien de particules solides

Code de calcul développé par M. Buffat

Simulations réalisées au Cines et sur le cluster dédié P2CHPD (Lyon 1)

- $Re = 2,260$  et  $12,250$
- $St = \tau_p / \tau_f = 1 - 125$
- $u_* / W_{chute} = 0,7 - 3,5$
- 200,000 particules ponctuelles
- Travail en cours
- Thèse de M. Prével
- Introduction des frontières immergées

*Transport de particules solides par la turbulence de paroi*

## Équations et nombres adimensionnels

DNS de la phase fluide :

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{\nabla} \wedge \vec{u}) \wedge \vec{u} + \vec{\nabla} \left( \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) - \nu \Delta \vec{u} = \vec{f} \quad \text{et} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0$$

Pas d'effet des  
particules sur le  
fluide

Approche spectrale Galerkin avec projection sur espace à divergence nulle

Pas de collisions  
entre particules

Suivi Lagrangien de particules solides ponctuelles :

$$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = C_d \frac{\vec{u} - \vec{v}_p}{\tau_p} + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) \vec{g} \quad \text{avec} \quad C_d = 1 \quad \text{si} \quad R_{ep} < 1$$

$$C_d = \frac{1}{(1 + 0.15 R_{ep})^{0.687}} \quad \text{si} \quad R_{ep} > 1$$

Interpolation d'ordre élevé (hermitienne 3D)

Nombres adimensionnels :

$$R_{e\tau} = \frac{u_\tau H}{\nu}$$

Nombre de  
Reynolds

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_f}$$

Nombre de  
Stokes

avec

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}$$

$$\tau_f = \frac{\nu}{u_\tau^2}$$

$$\gamma = \frac{\tau_p g}{u_\tau}$$

Paramètre de  
gravité

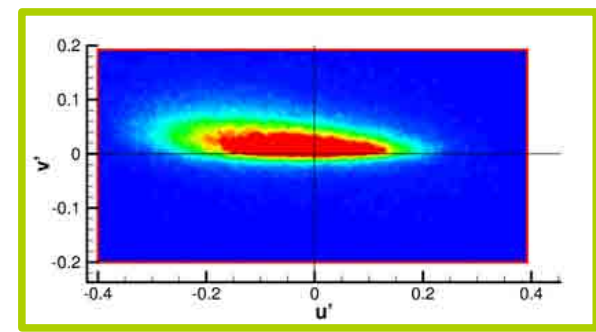
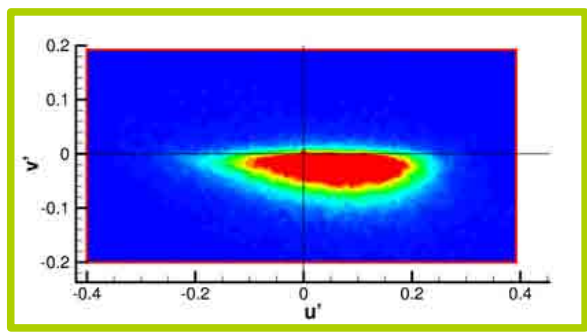
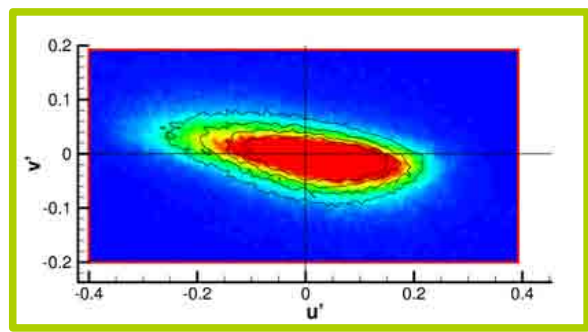
*Transport de particules solides par la turbulence de paroi*

## Résultats - Analyse par quadrants

Simulations numériques -  $Re = 12,500$   $St = 5$   $y^+ = 38$   $\gamma = 0$

$v_p < 0$

$v_p > 0$



$u'v'$  du fluide à la position  
des particules solides

$u'v'$  du fluide à la position  
des particules solides  
descendantes

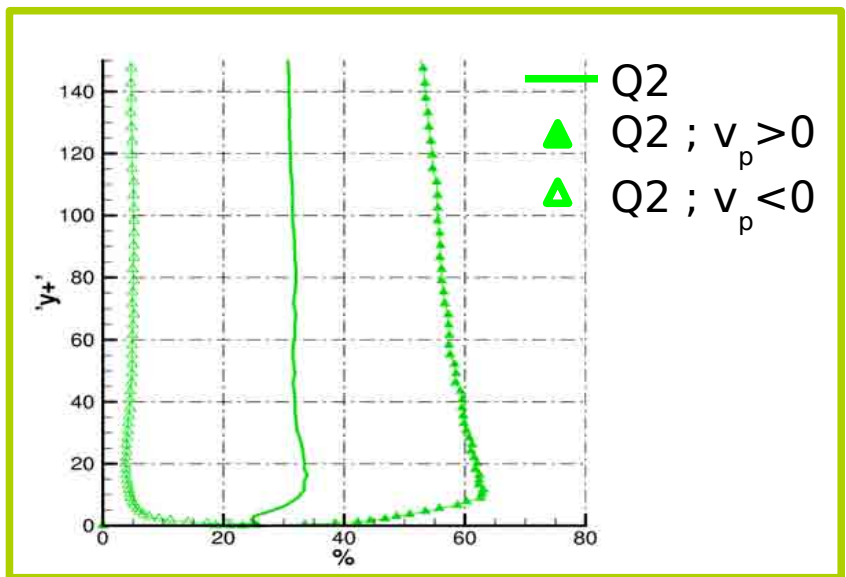
$u'v'$  du fluide à la position  
des particules solides  
montantes

Concentration préférentielle des particules  
montantes dans les éjections

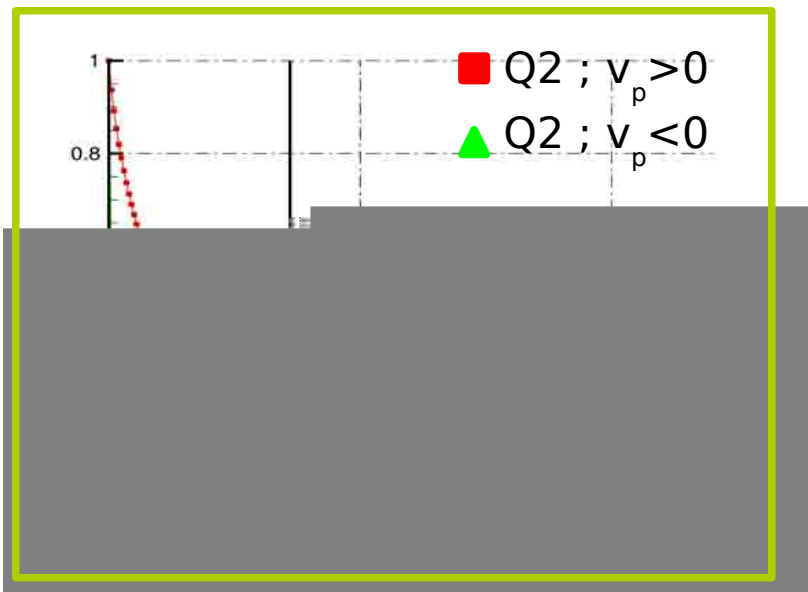


# Résultats - éjections et particules montantes

Simulations numériques -  $Re = 12,500$   $St = 5$   $\gamma = 0$



Particules montantes dans éjections (Q2)  
 quelque soit  $y^+$   
 Il existe des particules descendantes dans  
 les éjections (Q2)

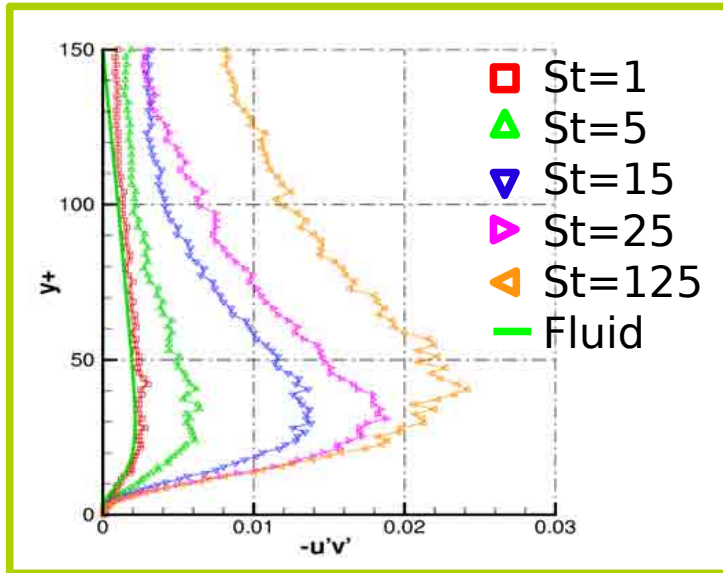


Les éjections (Q2) autour des particules  
 descendantes correspondent à des  
 faibles valeurs de  $u'v'$

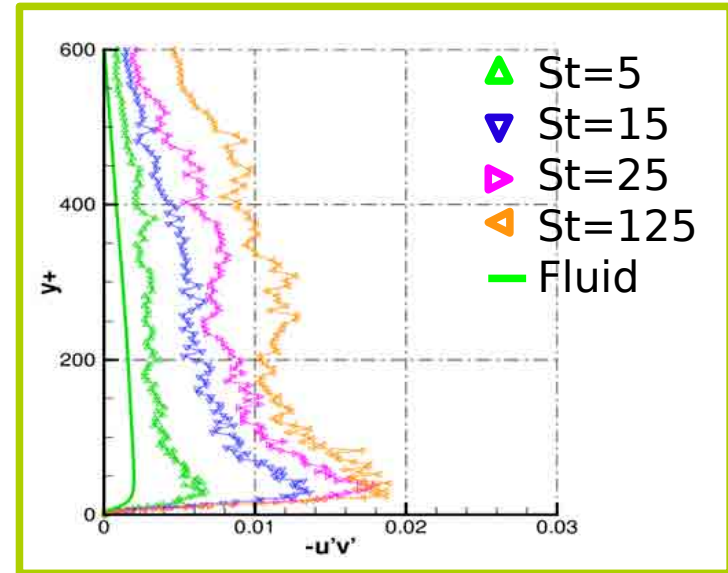
Seuil en  $u'v'$  à partir du quel toutes les particules  
 dans l'éjection montent

# Résultats - seuil en $u'v'$ pour les éjections

Simulations numériques -  $\gamma = 0$



Re = 2,260



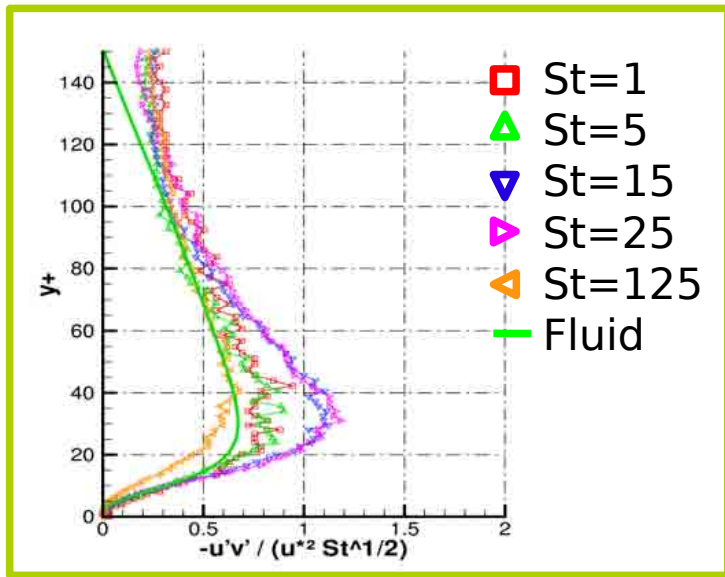
Re = 12,500

Seuil en  $u'v'$  pour différents Re et St

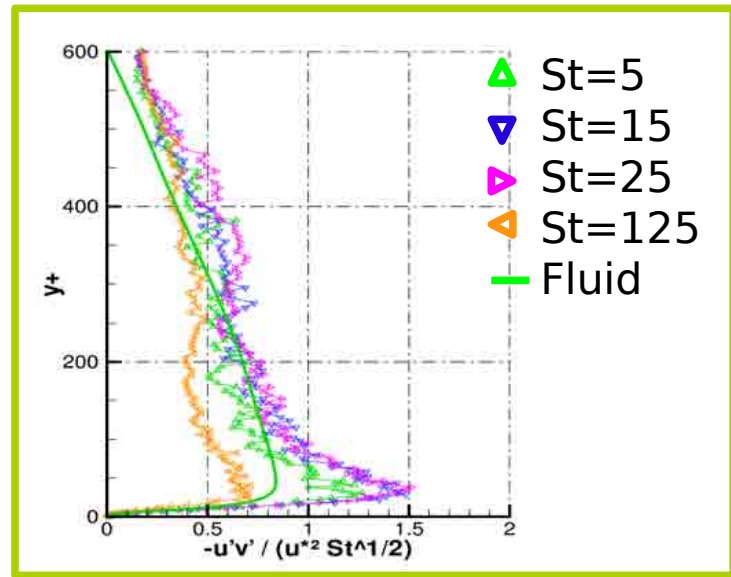
$$St = \frac{\tau_p}{\tau_f}$$

# Résultats - seuil en $u'v'$ pour les éjections

Simulations numériques -  $\gamma = 0$



Re = 2,260



Re = 12,500

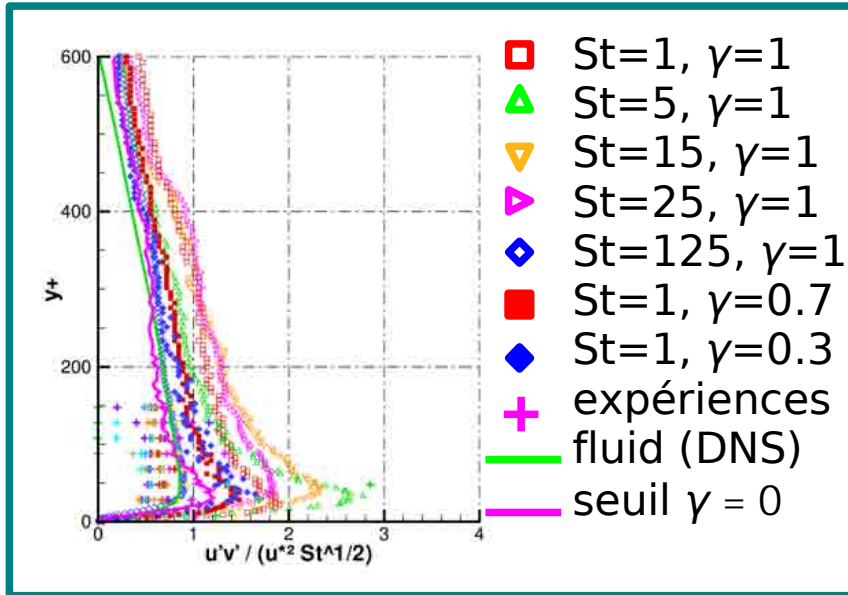
Seuil  $u'v'$  normé à partir du quel toutes les particules dans l'éjection montent

$$u'v'_{T} = \frac{u'v'}{u_{\tau}^2 St^{1/2}} \quad \text{avec} \quad St = \frac{\tau_p}{\tau_f}$$

*Transport de particules solides par la turbulence de paroi*

# Résultats - seuil en $u'v'$ pour les éjections

Comparaison entre expériences et simulations numériques



Expériences en canal à surface libre :

Re = 10,000 - 30,000

St = 4,2 - 13,6      $\gamma = 1,2 - 2,9$

Simulations numériques :

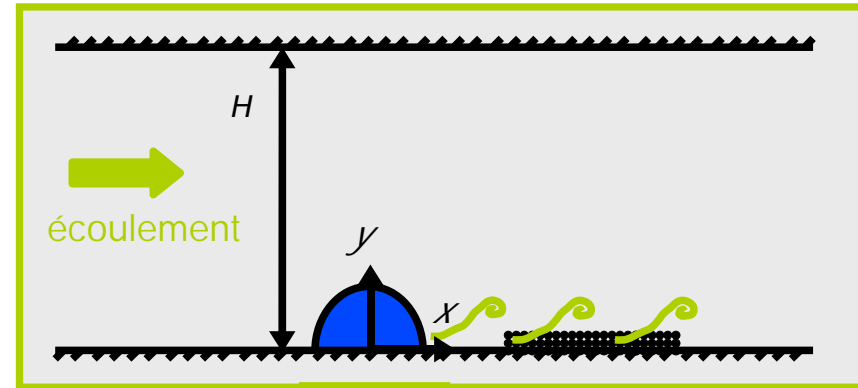
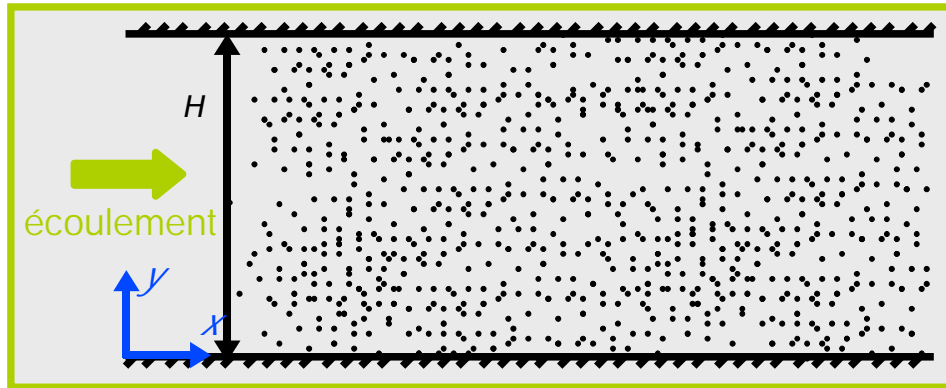
Re = 12,500

St = 1 - 125      $\gamma = 0,3 - 1$

Seuil  $u'v'$  normé à partir du quel toutes les particules dans l'éjection montent

$$u'v'_{T} = \frac{u'v'}{u_{\tau}^2 St^{1/2}}$$

## Conclusion et perspectives

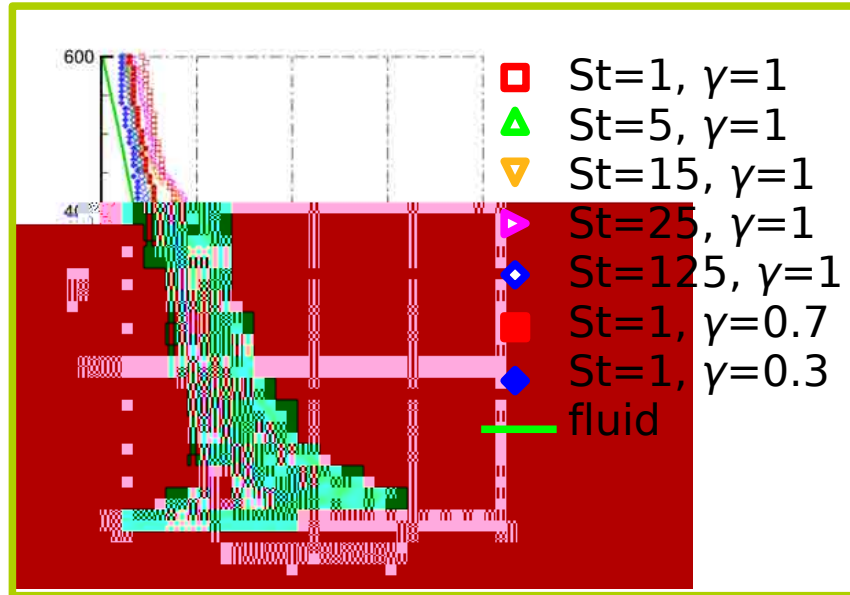


- Comparaison expériences – simulations numériques
  - Génération des tourbillons en épingle à cheveux de manière contrôlée
  - Suivi lagrangien des particules solides et du fluide à la position des particules

Utilisation du seuil pour les modèles de mise en suspension ou l'estimation du temps de résidence des particules dans les éjections

## Résultats - seuil en $u'v'$ pour les éjections

Simulations numériques -  $Re = 12,500$  et  $\gamma \neq 0$

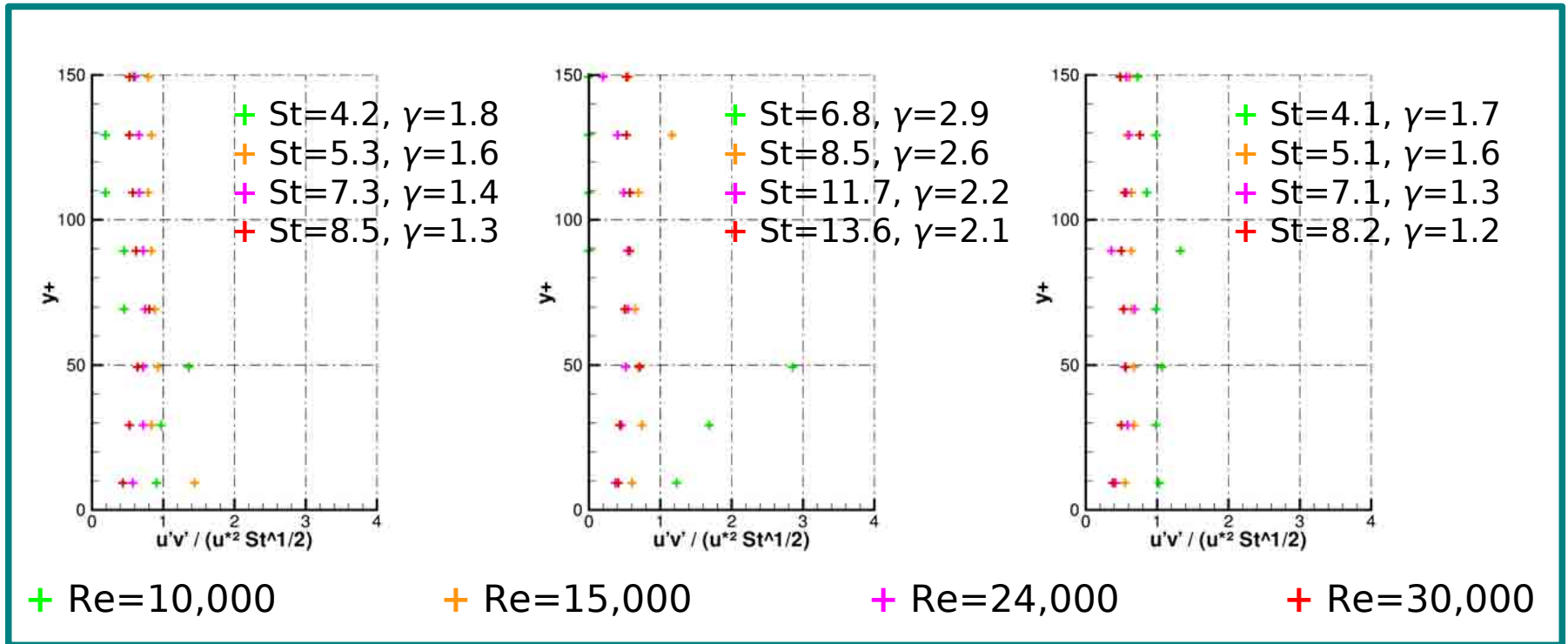


Seuil  $u'v'$  normé à partir du quel toutes les particules dans l'éjection montent

$$u'v'_T = \frac{u'v'}{u_\tau^2 St^{1/2}}$$

# Résultats – seuil en $u'v'$ pour les éjections

Expériences en canal à surface libre  $Re = 10,000 - 30,000$



$$u'v'_T = \frac{u'v'}{u_\tau St^{1/2}}$$

*Transport de particules solides par la turbulence de paroi*